

异构网络中基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案

王振朝^{1,2} 杨小龙¹

(河北大学电子信息工程学院 保定 071002)¹ (河北省数字医疗工程重点实验室 保定 071002)²

摘要 提出了一种基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案。在拥塞避免阶段,该方案首次以马尔科夫链模型为基础,对异构网络中各条路径上未被确认的数据包个数进行预测,进而计算出各条路径所能承载的最大数据量。若网络拥塞窗口值大于各条路径所能承载的最大数据量中最小值的 2 倍,则启动协作拥塞控制机制。在协作拥塞控制机制下,根据 AIMD 算法的加性增加准则调整拥塞窗口,若网络拥塞窗口值大于各条路径所能承载数据量之和,则结束协作拥塞控制机制,执行传统的 TCP 慢启动算法。为了提高慢启动阶段的带宽利用率,对 TCPW(TCP Westwood)带宽估计算法进行改进,使路径可用带宽的估计更准确,从而提高慢启动阈值设置的合理性。仿真结果表明,在保证异构网络负载均衡及单条 TCP 流公平性的前提下,该方案能够增加成功传输数据包的数量。

关键词 协作拥塞控制,多径并行数据传输,异构网络,马尔可夫模型,TCPW 带宽估测算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.6.020

Cooperative Congestion Control Scheme Based on MPTCP in Heterogeneous Network

WANG Zhen-chao^{1,2} YANG Xiao-long¹

(College of Electronic & Information Engineering, Hebei University, Baoding 071002, China)¹

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding 071002, China)²

Abstract A cooperative congestion control scheme based on MPTCP was proposed. At the stage of avoiding congestion, the unconfirmed data packets transferred in each route in heterogeneous network are predicted based on the Markov Model, and then the sender calculates the maximum amount of data that each route can carry. If the network congestion window is more than two times higher than the minimum of the maximum amount of data that every path can carry, the mechanism of cooperative congestion control will be started. Under the cooperative congestion control mechanism, the network congestion window should be adjusted according to the norm of additive increase of AIMD algorithm. If the sum of the carrying capacity of each path is less than the network congestion window, the cooperative congestion control mechanism should be ended, and then traditional slow start of TCP algorithm is implemented. To enhance broadband utilization at the slow start stage, this paper modified the broadband estimation algorithm of TCPW(TCP Westwood) to make the estimation of available broadband in each path more accurate and improve the reasonability of slow start threshold setting. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can increase the number of successful transmission data packets while guaranteeing the load balance and fairness between single TCP flow and MPTCP flow.

Keywords Cooperative congestion control, Multi-path parallel data transmission, Heterogeneous network, Markov model, TCPW

1 引言

异构网络需要有效的拥塞控制方案来减轻或避免网络拥塞,以提高网络的吞吐量,减少网络不必要的资源开销。针对多路径数据传输拥塞控制问题,已有许多学者提出了多种解决方案^[1-7]。但是现有方案很少考虑异构网络各条路径中未被确认的数据包个数、不同往返时间以及可用带宽估计值准确性对拥塞控制方案性能的影响。此外,当前网络中广泛使用的网络协议如 TCP 等对网络中各条路径单独进行拥塞

控制,不支持多路径传输。所以在综合考虑网络中重要参数的影响下,如何在异构网络中进行多路径拥塞控制数据传输成为亟待解决的问题。

Chang-qiao Xu 等人考虑到不同类型的丢包率对拥塞窗口自适应调整的影响,提出了一种基于用户服务质量感知的并行多径数据传输方案。虽然此方案综合考虑了各条路径中未被确认的数据包个数和丢包率,并且在用户服务质量等方面明显优于其他传输方案,但是其对各个接入网中的流量进行独立控制,而没有从整个异构网络的角度考虑分流方案对

到稿日期:2015-05-31 返修日期:2015-08-12 本文受河北省自然科学基金资助项目(F2014201168),保定市科学技术研究与发展指导计划项目(14ZG036)资助。

王振朝(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信,E-mail:hbuwzc898@163.com;杨小龙(1987—),男,硕士生,主要研究方向为异构无线网络通信及 MPTCP 的传输机制改进,E-mail:yxlhbu@163.com。

网络性能的作用^[8]。赵广松等人针对网络接收阈值不能实时调节的问题,提出了基于接收阈值容忍网络拥塞控制机制,此机制使网络中的每个节点可以根据自身的拥塞状况动态调整拥塞程度。该拥塞控制方案的优点是在减轻整个网络拥塞程度的基础上,不但保证了网络的吞吐量,而且减少了网络资源浪费^[9]。但该机制并不适用于节点缓存较小或者对端到端延时要求严格的网络,普适性较差。针对卫星网络通信路径发生改变引起往返时延突变,导致现有的拥塞控制机制中超时重传时间估计不准确,并对拥塞窗口计算产生不利影响的问题,杨力等人提出了一种基于链路长度的带宽估计 TCPW-BLC 算法^[10]。此算法对异构网络并不适用,并且没有定性分析慢启动阈值设置的合理性对网络拥塞控制策略的影响。Neda Mohammadzadeh 等人提出了一种基于用户服务质量 (QoS) 的协作拥塞控制方案,此拥塞控制方案在保证 QoS 的前提下,提高了整个网络的吞吐量,但是并未定性分析发送缓冲区接收缓存区的尺寸对拥塞控制性能的影响,且没有给出在协作拥塞控制区域内拥塞窗口的调整方式^[11]。

为提高网络带宽利用率和协作拥塞控制阈值确定的精确度,本文提出了一种新的基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案。本方案在拥塞避免阶段对异构网络中各条路径上未被确认的数据包个数建立马尔科夫模型,以此计算出当前网络中各条路径所能传输的最大数据量。当网络的拥塞窗口大于各条路径所能传输的最大数据量中最小值的 2 倍时,则启动协作拥塞控制机制。在协作拥塞控制条件下,拥塞窗口根据 AIMD 算法的加性增加准则进行增长,当网络拥塞窗口大于各条路径所能传输的最大数据量之和时,则结束协作拥塞控制,并且发送端根据改进的 TCPW 带宽估计算法调整慢启动阈值,执行传统 TCP 慢启动算法。

2 系统模型

本文研究的异构网络系统模型如图 1 所示,它由两种不同性质的接入网 (LTE、WiFi) 连接到主干网 (Internet) 构成。此模型中,每条端到端传输路由由 3 部分组成,其中包括发送端与接入网连接、主干网、接入网与接收端连接。本文异构网络中的协作被定义为 LTE 和 WiFi 的协作。

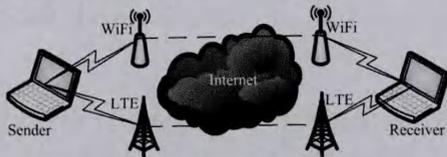


图 1 端对端协作拥塞控制系统模型

在一个稳定的端到端传输系统中,要求一种传输层协议能够根据网络状况实时调整发送端的发送速率。本系统在建立端到端连接的过程中采用多路径传输控制协议 (Multipath Transport Control Protocol, MPTCP)^[12]。MPTCP 协议需要对端反馈所有的地址信息,并且系统中 MPTCP 各条子流都有其独立的确认序号和拥塞窗口,其拥塞窗口变化具有相关性以及无后效性 (Markov 性)^[13,14],所以对此异构网络进行多径并行数据传输协作拥塞控制,不但可以使此系统中 MPTCP 各条子流具有自适应流量均衡的特性,而且可以使 MPTCP 流具有 TCP 公平性。本文提出的协作拥塞控制机制的具体控制过程如图 2 所示。

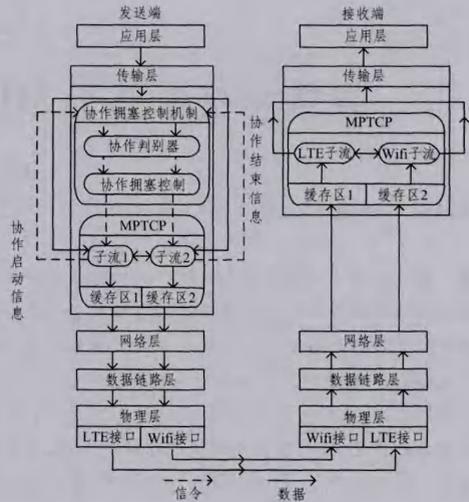


图 2 协作拥塞控制机制在异构网络中的应用结构

在现有的基于 MPTCP 的多径并行数据传输系统中,各条子流共享一个发送缓存区 (接收缓存区),这样系统就很难精确获得各条子路径的传输信息,而且还会因为缓存区空间有限而造成传输阻塞^[15]。当异构网络中多条路径之间的性质差异较大时,进行多径并行数据传输会造成这些子路径共享的缓存区被质量较差的子路径所要传输的数据填满。此时,即使传输质量较好的路径,也会因为受限于共享缓存区的大小,而不能最大限度地传输数据。为了避免上述问题的发生,并且正确评估异构网络中各条路径的传输能力,同时使协作拥塞控制机制的部署具有可靠的硬件支撑,提高网络传输数据的效率,本文将共享的发送缓存区 (接收缓存区) 根据各条路径的传输能力分配相应独立的缓存区。

3 基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案的设计

现有基于 MPTCP 的拥塞控制机制已经不能满足在多径数据传输中网络资源公平分配的要求。考虑到 MPTCP 各条路径上未被确认的数据包个数以及可用带宽对协作拥塞控制的影响,本节首先确定在拥塞避免阶段进行协作拥塞控制的开始和结束阈值,并且在网络拥塞的情况下,根据改进的 TCPW 带宽估计算法重新调整慢启动阈值。

3.1 协作拥塞控制阈值的确定

MPTCP 各条路径上传输的未被确认的数据包对协作拥塞控制区间值的确定具有重要作用。异构网络的链路状态变化可视为一种无后效性的随机过程^[16],这与马尔科夫过程的性质类似,因此本文针对 MPTCP 各条路径上未被确认的数据包个数建立了马尔科夫模型,以估测它的当前值。然后依据此值计算出当前 MPTCP 每条路径上所能承载的最大数据量,得到协作拥塞控制的开始和结束阈值。

为了准确地估测当前 MPTCP 各条路径上传输的未被确认的数据包个数,设 $n(t)_i, n(t-1)_i, n(t-2)_i, \dots, n(1)_i, n(0)_i$ 为链路 $i (i=0, 1)$ 在不同状态下路径中未被确认的数据包个数,根据其具有的马尔科夫过程性,假设随机过程中各个状态的 $n(t)_i$ 的概率分布仅与它的前一个状态 $n(t-1)_i$ 有关,而与随机工程中其它状态无关。此种假设可表示为:

$$P\langle n(t)_i | n(t-1)_i, n(t-2)_i, \dots, n(1)_i, n(0)_i \rangle \approx P\langle n(t)_i | n(t-1)_i \rangle \quad (1)$$

$P\langle n(t)_i | n(t-1)_i \rangle$ 的值可由前一时刻 $n(t-1)_i$ 的概率及

变化趋势获得。为了保证预测值的准确性,仍需考虑发送端获得的当前某条路径中传输的未被确认的数据包数 n_i ,则平滑预测路径 i 中当前时刻 $n(t)_i$ 的样值为:

$$n(t)_i = P(n(t)_i | n(t-1)_i) \cdot n(t-1)_i + [1 - P(n(t)_i | n(t-1)_i)] \cdot n_i \quad (2)$$

当前时刻路径 i 中 $n(t)_i$ 值由前一时刻估计的样值 $n(t-1)_i$ 和当前时刻发送端获得的网络中传输的未被确认数据包数 n_i 通过平滑加权计算得到;依次类推,可知当前时刻路径 i 中未被确认的数据包个数是由自系统启动以来的所有值通过加权求和平均所得,因此其平滑性能最优。

通过以上分析得到异构网络中当前时刻路径 i 中传输的未被确认的数据包个数 $n(t)_i$,根据式(3)确定路径 i 上所能承担的最大数据量。

$$D_i = \min [cwnd_i - n(t)_i, rwnd_i] \quad (3)$$

其中, $cwnd_i$ 是前一时刻路径 i 的拥塞窗口值; $n(t)_i$ 为估计当前网络中路径 i 中传输的未被确认的数据包个数; $rwnd_i$ 为路径 i 接收端的接收缓存大小。

根据以上计算结果得到当前时刻异构网络进行一次 MPTCP 会话的各路径所能承载的最大数据量中最小值的 2 倍即 $2\min(D_0, D_1)$ 以及它们的和 $D_0 + D_1$, 将其分别作为协作拥塞控制的开始和结束阈值。依据拥塞窗口 w 值将网络状态划分为 3 个等级: 无拥塞状态、协作拥塞控制状态、拥塞状态, 如表 1 所列。

表 1 网络状态划分

$w < 2\min(D_0, D_1)$	无拥塞
$2\min(D_0, D_1) \leq w < D_0 + D_1$	协作拥塞控制
$w \geq D_0 + D_1$	拥塞

根据表 1 所列, 若异构网络的拥塞窗口值 w 满足: $2\min(D_0, D_1) \leq w < D_0 + D_1$, 则异构网络开启协作拥塞控制机制。根据 AIMD 算法的加性增加准则调整拥塞窗口, 若异构网络的拥塞窗口值 w 满足: $w \geq D_0 + D_1$, 此时检测到网络发生拥塞, 则结束协作拥塞控制机制, 根据 3.2 节慢启动阈值调整算法重新设定慢启动阈值。

3.2 确定慢启动阈值

若慢启动阈值设定得不合理, 则会牺牲网络的带宽利用率或过早地使异构网络陷入拥塞状态。本文使用改进的 TCPW 带宽估计算法得到的慢启动阈值可以有效提高网络的带宽利用率, 降低异构网络中各条路径过早陷入拥塞状态的概率。

在确定协作拥塞控制结束阈值时, 最重要的是在关闭 MPTCP 连接的状态下, 单独使用 TCP 协议时对当前路径 i 可用带宽的评估。本文使用 TCPW 带宽估计算法^[12] 对异构网络中各条路径单独使用 TCP 协议时进行可用带宽的估计。

关于 TCPW 带宽估计的改进算法, 很多都只局限于对上行链路中数据测量方法的改进, 而没有考虑到下行链路中参数测量方法的改进对提高带宽估计精确度有着重要作用。本文所改进的 TCPW 带宽估计算法的主要思想是, 首先接收端每收到一个数据包后, 记录此数据包的到达时间, 相邻两个数据包的到达时间之差即是上一个数据包在下行链路的发送时间; 其次在接收端分别对到达的数据包大小和该数据包在下行链路上的发送时间求平均值; 然后将这些网络信息复制到

ACK 数据包上, 网络发送端根据返回的 ACK 数据包上的网络信息, 计算成功传输的数据包大小与在下行链路上成功传输一个数据包的时间平均值的比值, 得到各条路径使用单一 TCP 协议时的带宽采样值, 最后基于此带宽采样值, 使用指数加权移动平均滤波器平滑得到带宽估计值, 具体如下:

$$b_i^l = \frac{d_i^l}{\Delta t_i^l} \quad (4)$$

$$\Delta t_i^l = t_i^l - t_i^{l-1} \quad (5)$$

其中, b_i^l 表示路径 i 使用单一 TCP 协议时的带宽采样值, t_i^l 表示 TCP 协议建立连接后的第 l 个数据包到达接收端的时间, Δt_i^l 表示到达接收端相邻数据包的时间差, d_i^l 表示接收端收到路径 i 中第 l 个数据包的长度。

再分别对 d_i^l 和 Δt_i^l 进行平滑处理, 求得各自更加精确的采样值。

$$\bar{b}_i^l = \frac{\bar{d}_i^l}{\Delta t_i^l} \quad (6)$$

$$\bar{d}_i^l = \alpha \bar{d}_i^{l-1} + (1-\alpha) d_i^l \quad (7)$$

$$\Delta \bar{t}_i^l = \alpha \Delta t_i^{l-1} + (1-\alpha) t_i^l \quad (8)$$

其中, \bar{b}_i^l 表示路径 i 可用带宽采样值的平滑值; \bar{d}_i^l 表示接收端收到第 l 个数据包长度的平滑值; $\Delta \bar{t}_i^l$ 表示到达接收端相邻数据包的时间差的平滑值; α 是平滑的权值系数, 反映网络瞬时变化对采样带宽估计的影响程度, 此处取为 0.7。

接着利用所得采样带宽的估计值和上次可用带宽的估计值, 来估算当前各条路径使用单一 TCP 协议时可用带宽的估计值。针对网络中的突发流对网络造成的抖动问题, 本文通过平滑滤波器对当前各条路径使用单一 TCP 协议时可用带宽的估计值进行平滑处理, 如式(9)所示:

$$\bar{B}_i^l = \alpha_i \bar{B}_i^{l-1} + (1-\alpha_i) \left(\frac{d_i^l + d_i^{l-1}}{2} \right) \quad (9)$$

其中, \bar{B}_i^l 表示当前路径 i 使用单一 TCP 协议时可用带宽的平滑值, \bar{B}_i^{l-1} 表示前一时刻路径 i 使用单一 TCP 协议时可用带宽的平滑值, $\alpha_i = \frac{2\tau_i - \Delta t_i^l}{2\tau_i + \Delta t_i^l}$, $\frac{1}{\tau_i}$ 为低通滤波器的截止频率。 τ_i 的值随着链路 i 的状态动态变化。用当前网络中某条路径中传输的未被确认的数据包个数 $n(t)_i$ 来表征路径 i 的稳定性, 当路径稳定性较低时, $n(t)_i$ 值增大, 此时需要增大 τ_i 的值, 使式(9)的滤波器更加稳定。因为滤波器的采样间隔 $\frac{1}{\tau_i}$ 至多不超过 ACK 时间间隔的最大值, 所以 τ_i 应大于一个往返时间 RTT , τ_i 值如式(10)所示:

$$\tau_i = RTT_{average} + RTT_{average} \cdot \frac{n(t)_i}{n(t)_{max}} \quad (10)$$

其中, $RTT_{average}$ 是测量得到的 RTT 的平均值, 能够反映出链路的动态变化; $n(t)_{max}$ 表征在历次测量中 $n(t)_i$ 的最大值。上述 τ_i 的自适应算法能够保证预测当前的平滑带宽值动态反映出链路的变化, 并且能够消除随机噪声对带宽预测的影响。

通过以上分析得到当前异构网络中路径 i 使用单一 TCP 协议时的可用带宽 \bar{B}_i^l , 根据式(11)得到当前异构网络中路径 i 使用单一 TCP 协议所能承载的数据量 D_i^{TCP} 。

$$D_i^{TCP} = \bar{B}_i^l \cdot RTT_{average} \quad (11)$$

由上可得出异构网络中各条路径使用单一 TCP 协议时各条路径所能承载数据量中的最小值 $D_{\min}^{\text{TCP}} = \min(D_0^{\text{TCP}}, D_1^{\text{TCP}})$, 将此值作为调整之后的慢启动阈值。

3.3 协作拥塞控制的执行步骤

步骤 1 建立 MPTCP 连接后, 发送端根据异构网络所预设的拥塞控制参数初始化拥塞窗口值。

步骤 2 如果一个数据包到达接收端, 则发送端根据返回的 ACK 数据包上的网络信息预测当前网络的 $n(t)_i, \overline{B}_i^c$ 等参数值, 计算使用 MPTCP 各条路径上所能承载的最大数据量 $D_i = \min[\text{cwnd}_i - n(t)_i, \text{rwnd}_i]$, 以及当前时刻各条路径使用单一 TCP 协议时所能发送的最大数据量 $D_i^{\text{TCP}} = \overline{B}_i^c \cdot \text{RTT}_{\text{average}}$ 。

步骤 3 若当前时刻网络的拥塞窗口 w 满足 $w < 2\min(D_0, D_1)$, 转向步骤 4; 若 $2\min(D_0, D_1) \leq w < D_0 + D_1$, 则启动协作拥塞控制机制, 转向步骤 4; 若 $w \geq D_0 + D_1$, 则异构网络结束协作拥塞控制, 转向步骤 5。

步骤 4 网络拥塞窗口根据 AIMD 算法的加性增加准则进行增长, 转向步骤 3。

步骤 5 将异构网络的慢启动阈值调整为 $D_{\min}^{\text{TCP}} = \min(D_0^{\text{TCP}}, D_1^{\text{TCP}})$, 重新设置拥塞窗口值, 执行传统的 TCP 慢启动算法。

步骤 6 重复执行步骤 2-步骤 5, 直到数据传输结束。

4 仿真和实验结果分析

本文使用 NS-3. 20^[17] 对提出的基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案进行仿真, 并且使用了 MPTCP 工作组提供的 MPTCP 传输层开源模块, 此时需要对 TCP 套接字进行修改, 新定义的套接字将仿真网络中 MPTCP 接收缓冲区的容量设定为 2. 55Mbytes^[18]。

4.1 仿真条件设定

仿真的网络拓扑如图 3 所示, 包括 1 个作为数据源的服务器(Server)、3 个移动终端(UE- $i, i=1, 2, 3$)、1 个 LTE 无线节点和 1 个 WiFi 无线接入节点。其中 UE-1 在 LTE 无线信号覆盖区域, UE-2 在 WiFi 无线信号覆盖区域, UE-3 在 LTE 和 WiFi 无线信号重叠区域。在本仿真中, 只研究 UE-3 的数据传输性能, 因为只有 UE-3 位于两个无线接入节点的重叠区域, 并且 UE-3 支持 LTE 和 WiFi 无线界面同时工作。

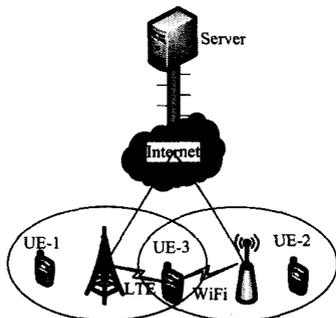


图 3 基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案的仿真拓扑

基于图 3 的网络拓扑结构, 按照以下 5 种情形进行网络仿真。

情形 1(S-WiFi): 建立一条 UE-3, 只使用 WiFi 无线接入点和源服务器进行通信的 WiFi 数据传输链路。UE-3 与

WiFi 无线接入点和 LTE 无线接入节点的距离分别是 30m。WiFi 链路的带宽设置为 10Mbps, 时延均为 10ms, 网络中传输的每个数据包大小为 1500bytes。MPTCP 流和参考 TCP 流以及背景 TCP 流都在仿真时间为 0s 时启动数据传输, 仿真时间为 50s。

情形 2(S-LTE): 建立一条 UE-3, 只使用 LTE 无线接入点和源服务器进行通信的 LTE 数据传输链路。LTE 链路的带宽设置为 10Mbps, 其它参数同情形 1。

情形 3(MH-NC): WiFi 传输链路和 LTE 传输链路同时进行多路径传输, 传输协议使用 MPTCP 协议, 其它参数同情形 2。

情形 4(MH-3C): 在异构网络中使用文献[11]中的基于用户 QoS 的协作拥塞控制方案, 其它参数同情形 3。

情形 5(MH-CS): 在异构网络中使用本文提出的基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案, 其它参数同情形 4。

4.2 仿真结果分析

本文对提出的方案在发送端以 1.0 packet/s 的速率进行数据传输时网络成功传送数据包个数的性能进行了仿真, 仿真结果如图 4 所示。在成功传输数据包个数方面, 系统使用基于 MPTCP 的协作拥塞控制方案的情形明显优于使用文献[11]方案的情形和不使用协作拥塞控制方案的情形, 主要原因是本文提出的方案在确定协作拥塞控制的开始和结束阈值时, 综合考虑了网络中各条路径中未被确认的数据包个数及接收窗口等网络参数对拥塞控制的影响, 有效延长了拥塞避免阶段的时长, 降低了网络不必要的拥塞。但是文献[11]的方案只是考虑了队列延时对协作阈值的影响, 不能综合考虑网络其它参数对拥塞控制性能的影响。因此, 本方案能够增加成功传输的数据包个数, 降低系统的掉包率。

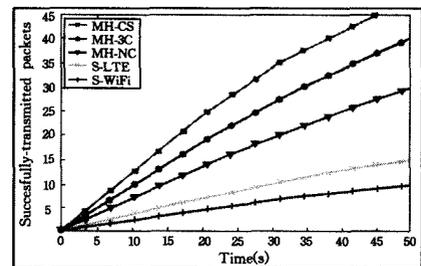


图 4 数据传输速率为 1.0 packet/s 时, 成功传送数据包的数量

拥塞控制方案的性能取决于单位时间内到达的数据包个数与处理的数据包个数之比^[11], 仿真结果如图 5 所示。随着单位时间内到达的数据包个数与处理的数据包个数之比的增大, 系统中各条路径拥塞的可能性增加, 当单位时间内到达的数据包个数与处理的数据包个数之比处在 0.8 时, 系统的吞吐量开始下降, 但本文提出的协作拥塞控制方案的吞吐量的下降趋势比文献[11]的方案和不进行协作拥塞控制的情形平缓。这是因为本文提出的方案能够有效延长拥塞避免阶段的时长, 随着拥塞窗口的增加, 尽可能地将潜在拥塞路径中的数据量分配到拥塞程度较轻的路径中, 因此协作拥塞控制情形的吞吐量下降比其它情形平缓。另外, 从图 5 可以看出, 使用单一网络进行数据传输时, 虽然吞吐量变化很稳定, 但是吞吐量比其它情形明显降低很多。所以本文提出的方案在数据传输方面优于其它方案。

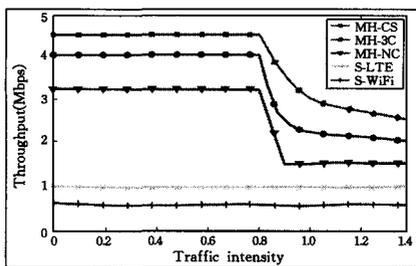


图5 网络的吞吐量和单位时间内到达数据包数量与处理的数据包数量之比的关系

结束语 本文提出的基于MPTCP的协作拥塞控制方案,在拥塞避免阶段,首次以马尔科夫模型为基础,精确预测出异构网络中各条路径中未被确认的数据包个数,以此计算出合理的协作拥塞控制开始和结束阈值,进而最大限度地延长了拥塞避免阶段的时长,避免了不必要的网络拥塞。在协作拥塞控制情况下,当检测到网络发生拥塞时,则结束协作拥塞控制机制,并且依据改进的TCPW带宽估计算法重新设置慢启动阈值,执行传统TCP慢启动算法。通过改进的TCPW带宽估计算法,能够提高网络的带宽利用率,使慢启动阈值的设定更加合理。由NS3的仿真结果可知,本方案在保证网络平均吞吐量提高的情况下,能够有效增加网络成功传输数据包的个数,对单位时间内到达数据包个数与处理的数据包个数之比的增大具有良好的适应性。

参考文献

[1] Qian Peng, Dong En-qing, Xu Juan, et al. Multipath? Routing Protocol Based on Congestion Control Mechanism Implemented by ross-Layer Design Concept for WSN[C]//2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE). Chengdu: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 378-384

[2] Wu J, Yuen C, Wang M, et al. Content-Aware Concurrent Multipath Transfer for High-Definition Video Streaming over Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(3): 710-723

[3] Wu Ji-yan, Cheng Bo, Yuen Chan, et al. Distortion-Aware Concurrent Multipath Transfer for Mobile Video Streaming in Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(4): 688-701

[4] Yu Dong-ping, Wang Cong, Zhang Jian-feng, et al. Improvement of data scheduling mechanism in concurrent multipath data transfer[C]//2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology (ICIST). Shenzhen: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 110-114

[5] Wang Jian-xin, Gong Hao, Chen Jian-er. A Cooperant Congestion Control Protocol in High Bandwidth-Delay Product Networks[J]. Journal of Software, 2008, 19(1): 125-135 (in Chinese)

王建新, 龚皓, 陈建二. 高带宽延时网络中一种协同式拥塞控制协议[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 125-135

[6] Xia Wen-jie, Li Qian-mu, Liu Feng-yu, et al. Congestion control and saturation condition in multi-hop Ad hoc based on quasi-birth-and-death model[J]. Computer Science, 2012, 39(4): 110-113 (in Chinese)

夏文杰, 李千目, 刘凤玉, 等. 基于拟生灭过程的多跳 Ad hoc 网络洪范方式下拥塞控制及饱和条件研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(4): 110-113

[7] Park S Y, Joo C, Park Y, et al. Impact of Traffic Splitting on the Delay Performance of MPTCP[C]// Proceeding of the 2014 IEEE International Conference on Communications (ICC). Sydney: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 1204-1209

[8] Xu Chang-qiao, Liu Tian-jiao, Guan Jian-feng, et al. CMT-QA: Quality-Aware Adaptive Concurrent Multipath Data Transfer in Heterogeneous Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(11): 2193-2205

[9] Zhao Guang-song, Chen Ming. Congestion Control Mechanism based on accepting Threshold in Delay Tolerant Networks[J]. Journal of Software, 2013, 24(1): 153-163 (in Chinese)

赵广松, 陈鸣. 基于接收阈值的容延网络拥塞控制机制[J]. 软件学报, 2013, 24(1): 153-163

[10] Yang Li, Li Jing-sen, Wei De-bin, et al. A Congestion Control Algorithm for High Dynamic Satellite Networks[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(8): 953-960 (in Chinese)

杨力, 李静森, 魏德宾, 等. 一种高动态卫星网络的拥塞控制算法[J]. 宇航学报, 2014, 35(8): 953-960

[11] Mohammadzadeh N, Zhuang Wei-hua. Cooperation of Heterogeneous Wireless Networks in End-to-End Congestion Control for QoS Provisioning[C]// 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2013: 6454-6458

[12] Raimagia D G, Chanda C N. A novel approach to enhance performance of Linux-TCP Westwood on wireless Link[C]//Nirma University International Conference on Engineering (NUI-CONE). Ahmedabad: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2012: 1-6

[13] Xu Ming-wei, Zhang Zhi-chao. Markov modeling of MPTCP's Coupled congestion control[J]. J Tsing hua Univ (Sci & Tech), 2012, 52(9): 1281-1285 (in Chinese)

徐明伟, 张志超. MPTCP 联合拥塞控制机制的 Markov 模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(9): 1281-1285

[14] Shi Zheng, Zhu Qi. Performance Analysis and Optimization Based on Markov Process for Heterogeneous wireless Networks[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(9): 2224-2229 (in Chinese)

施政, 朱琦. 基于马尔科夫过程的异构网络性能分析与优化[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(9): 2224-2229

[15] Zhou D, Song W, Wang P, et al. Multipath TCP for user cooperation in LTE networks[J]. IEEE Network Magazine, 2015, 29(1): 18-24

[16] Chen Rui, Wang Wen-nai, Zhu Jing-ling, et al. A Round-Trip-Time based Concurrent Transmission Scheduling for MPTCP[C]//2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Nanjing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014: 1-5

[17] MPTCP implementation for NS-3[OL]. <https://code.google.com/p/mptcp-ns3>

[18] Chen S, Yuan Z, Muntean G M. An Energy-aware Multipath TCP-based Content Delivery Scheme in Heterogeneous Wireless Networks[C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, China, 2013: 1291-1296